

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝROBA BEZRÁMOVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FOREM S BENTONITOVÝM POJIVEM NA AUTOMATICKÝCH FORMOVACÍCH LINKÁCH

THE PRODUCTION OF UNFRAMED FOUNDRY MOULDS WITH BENTONITE BINDER  
ON AUTOMATIC MOLDING LINES

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Macko

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Cupák, Ph.D.

BRNO 2016

**ABSTRAKT**

Tato práce si klade za cíl popsat technologii výroby bezrámových slévárenských forem na automatických formovacích linkách se zvláštním přihlédnutím k formám s bentonitovým pojivem a následně tuto technologii srovnat s výrobou rámových forem.

**Klíčová slova**

bezrámové formy, disamatic, bentonit, bentonitové pojivo, formovací směsi

**ABSTRACT**

This thesis aims to describe production of unframed foundry moulds on automatic molding lines with special focus on moulds with bentonite binder, while comparing it to production on framed molding lines.

**Key words**

flaskless moulds, disamatic, bentonite, bentonite binder, forming mixture

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MACKO, Martin. *Výroba bezrámových slévárenských forem s bentonitovým pojivem na automatických formovacích linkách*. Brno 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 35 s. Vedoucí práce Ing. Petr Cupák, Ph.D.

**PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výroba bezrámových slévárenských forem s bentonitovým pojivem na automatických formovacích linkách** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum\_\_\_\_\_  
Martin Macko

**PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto svému vedoucímu Ing. Petru Cupákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

**OBSAH****ÚVOD**

<b>1</b>	<b>VÝROBA SLÉVÁRENSKÝCH FOREM.....</b>	<b>10</b>
1.1	Ruční formování.....	10
1.2	Strojní formování.....	11
1.2.1	Lisování.....	11
1.2.2	Střásání.....	12
1.2.3	Foukání s dolisováním.....	12
1.2.4	Vstřelování s dolisováním.....	12
1.2.5	Metání.....	12
<b>2</b>	<b>FORMOVACÍ SMĚSI.....</b>	<b>13</b>
2.1	Ostřiva.....	13
2.1.1	Ostřiva kyselého charakteru.....	13
2.1.2	Ostřiva zásaditého charakteru.....	14
2.1.3	Ostřiva neutrálního charakteru.....	14
2.2	Pojiva.....	15
2.2.1	Struktura anorganických pojiv.....	15
2.2.2	Struktura organických pojiv.....	27
<b>3</b>	<b>FORMOVACÍ SMĚSI S BENTONITOVÝM POJIVEM.....</b>	<b>19</b>
3.1	Natrifikace bentonitů.....	20
3.2	Jednotná bentonitová směs.....	21
3.3	Technologické vlastnosti bentonitových směsí.....	21
<b>4</b>	<b>VÝROBA BEZRÁMOVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FOREM.....</b>	<b>24</b>
4.1	Metoda Croning.....	24
4.2	Metoda horkých jaderníků (hot-box).....	25
<b>5</b>	<b>AUTOMATICKÉ BEZRÁMOVÉ FORMOVACÍ LINKY.....</b>	<b>26</b>
5.1	Bezrámové formovací linky s vertikální dělicí rovinou.....	26
5.2	Bezrámové formovací linky s horizontální dělicí rovinou.....	29
5.2.1	Bezrámové formovací stroje vstřelovací a lisovací.....	29
5.2.2	Bezrámové formovací stroje podtlakové a lisovací.....	30
5.2.3	Bezrámové formovací stroje lisovací.....	31
<b>6</b>	<b>SROVNÁNÍ BEZRÁMOVÝCH LINEK A LINEK S RÁMY.....</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>34</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>		

## ÚVOD

Slévárenství je jednou z nejstarších metod výroby a jeho počátky jsou starší více než 5000 let. Kořeny tohoto oboru můžeme nalézt v kulturách staré Persie, Číny a Egypta. Na území České republiky jsou první odlitky doloženy v době Halštatské v 1. tisíciletí př.n.l.

Klíčovou dobou pro rozvoj slévárenství se stala průmyslová revoluce (v 18. – 19. stol.). Do té doby se datují vynálezy některých důležitých slévárenských zařízení, jako např. kuplovna nebo moderní tavicí kelímek.

V roce 1964 byla představena první automatická bezrámová formovací linka Disamatic. Od 60. let do roku 2000 bylo prodáno více než 1200 těchto linek s vertikální dělicí rovinou. Firma DISA Industries A/S se na světovém trhu udržovala více než 30 let téměř bez konkurence, ačkoli v SSSR a Japonsku se vyráběly úspěšné kopie jejích výrobků. Na konci 90. let skončila patentová ochrana, což umožnilo další větší rozvoj výroby automatických bezrámových formovacích linek.

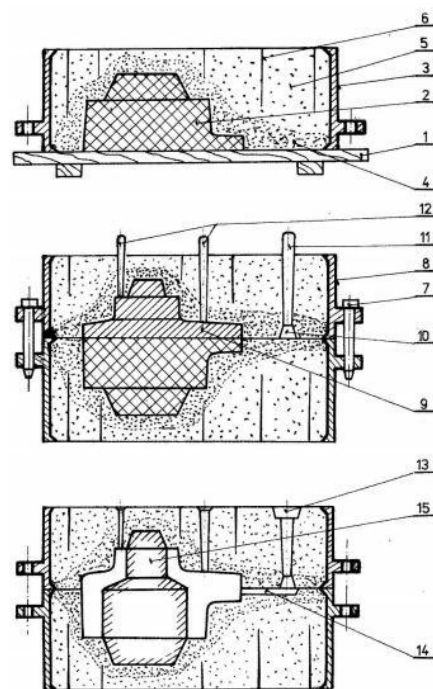
## VÝROBA SLÉVÁRENSKÝCH FOREM

Slévárenská forma je základním prostředkem, nutným ke zhotovení odlitku. Tvar formy tvoří negativ tvaru budoucího odlitku.

### 1.1 Ruční formování

Jedná se o výrobu netrvalých forem otevřených i uzavřených. Formy lze zhotovit pomocí formovacích ráků i do pudy slévárny, dle potřeby je do formy možné vložit jádra.

Postup ručního formování na model je uveden na obrázku 1. Nejprve je na formovací desku (1) položena část modelu (2) společně se spodní částí formovacího ráku (3). Následně je povrch modelu zaprášen dělicím práškem a poté je do ráku nasypáno množství formovací směsi dostatečné k tomu, aby zakrylo model a formovací desku. Poté, co je tato vrstva upěchována je do ráku nasypána první vrstva výplňové směsi. Každá vrstva této směsi je upěchována (ručně nebo pneumatickou pěchovačkou) a zbytek je seříznut ocelovým pravítkem. Následně jsou bodcem vytvořeny průduchy.



Spodní část ráku je poté i s formovací deskou obrácena a deska je odstraněna. Na spodní část ráku je nasazena a pomocí zaváděcích kolíků (7) zajištěna vrchní část ráku (8). Do vrchní části je založena druhá část modelu (9) společně s modelem odstruskovače (10), vtokového kanálu (11) a výfuků (12). Povrch modelu a dělicí rovina je zaprášena dělicím práškem, do ráku je vsypána modelová směs a následně se pokračuje stejně jako při zaformování spodní části. Okolo modelu vtokového kanálu se vyřízne vtoková jamka (13) a bodcem jsou opět napíchnuty průduchy. Modely výfuků a vtokového kanálu jsou uvolněny poklepem.

Po odstranění zaváděcích kolíků a obrácení vrchní části formy je vyjmuta horní část modelu (9) spolu s modelem odstruskovače (10). Ve spodní části formy jsou vytvořeny vtokové zářezy a vyjmuta spodní část modelu. Po uhlazení vnitřních částí formy se obě části zapráší grafitem. Podle potřeby je následně možné založit jádro (15). Forma je dokončena složením a zajištěním zaváděcími kolíky.

Pro potřeby kusové výroby větších odlitků je možné využít formování šablonováním. Při použití této metody odpadá nutnost výroby drahého modelu, nevýhodou je ale náročnost a doba formovacího procesu [1].



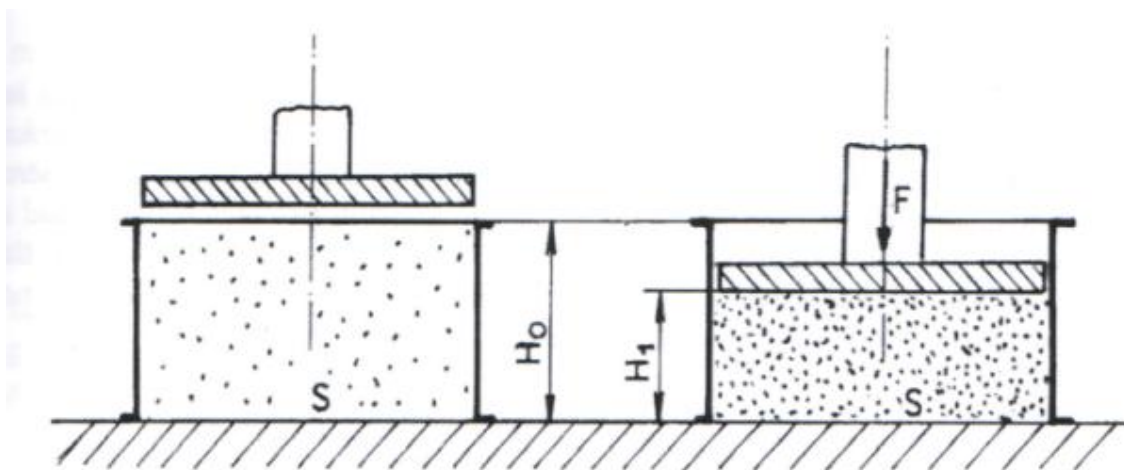
## 1.2 Strojní formování

Strojní formování odstraňuje nevýhody spojené s malou produktivitou a náročností práce při ručním formování a s malou přesností odlitků z takto vyrobených forem. Dle druhu formovacího stroje můžeme strojní formování dělit na:

- lisování
- střešování
- metání
- foukání
- vstřelování
- impakt proces
- kombinace předchozích způsobů [1].

### 1.2.1 Lisování

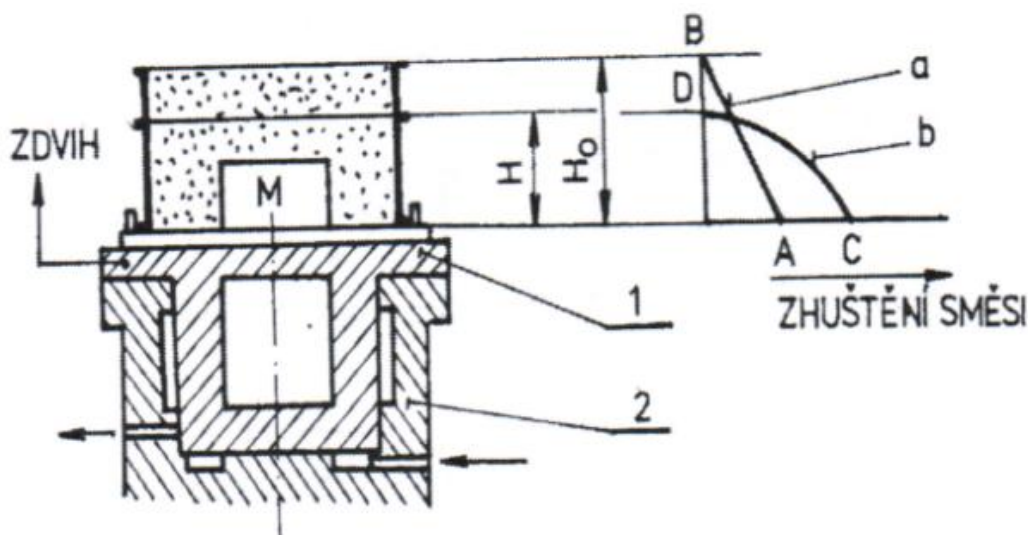
První lisovací stroje byly zavedeny už na konci 19. století. Zhutňování směsi probíhá pomocí pohyblivé lisovací desky. Lisování se vyznačuje nízkou provozní hlučností, mezi nedostatky patří zejména nerovnoměrné zhutnění (upěchování) směsi (čím větší vzdálenost od lisovací desky, tím menší zhutnění). Užívají se dva způsoby lisování, horní a spodní [1,2].



Obr. 2 – Schéma lisování [1]

### 1.2.2 Střásání

Princip střásání spočívá ve využití energie formovací směsi, která je uložena v rámu, zvedajícím se společně s formovací deskou asi o 80 mm. Při dopadu je směs zhuštěna, nejvíce u modelové desky (potenciální energie modelové směsi je zde největší). Aby se směs více zhutnila, proces se opakuje, případně se může použít dolisování. Hlavní nevýhodou je vysoká hlučnost (až 115 dB/A) a přenášení vibrací do základů [1,2].



Obr. 3 – Střásání s průběhem zhutnění směsi [1]

### 1.2.3 Foukání s dolisováním

Při foukání je formovací směs zhutňována tlakem vnikajícího vzduchu, model tedy musí být opatřen průduchy. Kvůli nerovnoměrnému zhutnění se užívá dolisování, které směs dodatečně zhutní zejména ve vyšších vrstvách formy. Formy poté disponují vysokou kvalitou a rovnoměrnou tvrdostí. Pro foukací stroje je charakteristická nízká hladina hluku (do 80 dB/A) a absence vibrací [1,2].

### 1.2.4 Vstřelování s dolisováním

Jedná se o metodu výroby bezrámových slévárenských forem s vertikální dělicí rovinou, používanou u strojů DISAMATIC. Tato technologie bude podrobně rozebrána v kapitole 5 [1].

### 1.2.5 Metání

Metání je metoda výroby rozměrných forem pomocí pískometů. Podstat technologie spočívá ve vrhání směsi velkou rychlostí (30-40 m/s) velkou rychlostí do formy, kde se po dopadu vlivem velké změny kinetické energie zhutňuje. V současnosti je tato technologie nahrazována technologií samotuhnoucích směsí [1].

## 2 FORMOVACÍ SMĚSI

Formovací směs je základním materiálem, užívaným k výrobě slévárenských forem. Základní složky každé formovací směsi jsou:

- ostřivo
- pojivo

Ostřivo tvoří až 98% hmotnosti formovací směsi. Velikost částic přesahuje 0,02 mm. Pojivo představuje látku či směs látek, která vytváří vazbu mezi částicemi ostřiva a dále mu dodávají:

- vaznost
- pevnost po vysušení
- pevnost po odlití
- pevnost za vysokých teplot

Podle chemické povahy rozdělujeme ostřiva na:

- kyselého charakteru
- zásaditého charakteru
- neutrálního charakteru [1,3,4]

### 2.1 Ostřiva

#### 2.1.1 Ostřiva kyselého charakteru

- Křemen

Oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$  je nejpoužívanějším ostřivem formovacích směsí. Díky svojí teplotě tání  $1715^\circ\text{C}$  je vhodný k odlévání většiny slévárenských slitin, včetně neželezných kovů. Při ohřevu prodělává polymorfní přeměny, které mohou způsobit porušení celistvosti formy, a to zejména při přeměně křemenu na křemenβ při  $573^\circ\text{C}$  kvůli velké objemové změně. Nejčastějšími důsledky těchto změn je snížení pevnosti líce formy a povrchové vady odlitku (např. zadrobeniny, zapečeniny, zálupy).

Křemenné písky obsahují minerály s nepříznivým účinkem na jakost odlitků, jejichž podíl by neměl překročit 3 % obsahu. Tyto minerály, především slída, živec a uhličitany, způsobují spékavost směsi a následně snížení jakosti povrchu odlitků.

Povrch neupravovaných křemenných písků bývá potažen hydratovaným křemenem nebo hydroxidem hlinitým, železitým nebo jíly. Přes malou tloušťku této vrstvy má velký vliv na přilnavost pojiv [1,4].

### 2.1.2 Ostřiva zásaditého charakteru

- Magnezit

Základní složkou horniny magnezitu, z něhož se ostřivo získává, je uhličitán hořečnatý  $\text{MgCO}_3$ . Pro získání ostřiva je třeba nejprve surový magnezit zbavit  $\text{CO}_2$  a transformovat na oxid hořečnatý  $\text{MgO}$ , který na vzduchu snadno pohlcuje vodu. Pálením do slinutí s oxidy železa při teplotách nad  $1400^\circ\text{C}$  vzniká slinutý magnezit s vysokou žáruvzdorností okolo  $2000^\circ\text{C}$ . Takto upravený magnezit lze použít k vyzdívání tavicích pecí. Rozdrcením tvarovek či odpadních cihel dostáváme zrnitý magnezit pro výrobu forem pro masivní odlitky z manganových ocelí. Nevýhodou tohoto ostřiva je malá odolnost proti náhlým změnám teploty [1,4].

- Chrommagnezit

Chrom je do magnezitu přidáván pro zvýšení odolnosti proti náhlým změnám teploty. Chrommagnezit je tvořen směsí slinutého magnezitu a chromové rudy obsahující minerál chromit, přičemž největší odolnost proti změnám teploty mají směsi 65 % magnezitu a 35 % chromitu. Jedná se o kvalitní ostřivo používané pro odlévání speciálních legovaných ocelí [1,4].

### 2.1.3 Ostřiva neutrálního charakteru

- Šamot

Jedná se o vypálený žáruvzdorný jíl, s minimálním podílem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  30 %. Pokud je použit plavený kaolín, tento podíl vzrůstá až na 45 %. Pro účely slévárenských forem je nejčastěji používán středně žáruvzdorný šamot, jehož hlavní složkou je kaolinit  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Kvůli vysoké energetické náročnosti se od jeho používání upouští [1,4].

- Silimanit, mullit
- Spinely
- Korund
- Olivín
- Zirkon [4].

## 2.2 Pojiva

Dle chemické povahy je dělíme na organická a anorganická.

- Anorganická pojiva

Formovací směsi poskytují vaznost již za syrova nebo ji vytvrzují po zpevnění. Mezi jejich hlavní přednosti patří malá citlivost na teplotu sušení a malá produkce plynů při lití. Po odlití se ale vyznačují špatnou rozpadavostí. Mezi tato pojiva patří např. jíly, vodní sklo, sádra, cement aj.[1,4]

- Organická pojiva

Pro tato pojiva je charakteristická možnost řízeného tepelného či chemického ztužení, vysoká produkce plynů při lití, dobrá rozpadavost a s tím spojené snadné čištění odlitků. Do této skupiny náleží např. umělé pryskyřice, oleje, sacharidy bitumeny aj.[1,4]

### 2.2.1 Struktura anorganických pojiv

Jílová pojiva se řadí mezi nejvýznamnější pojiva formovacích směsí. Užívají se při formování jak na syrovo tak i na sušení (které se už ale v průmyslu téměř nepoužívá), po vysušení poskytují dobrou vaznost a pevnost. Jílem se nazývá zemina s minimálním podílem 50 % částic menších než 2  $\mu\text{m}$ . Jsou to vrstevnaté silikáty, které rozdělujeme na několik skupin minerálů, podle stupně substituce křemíku hliníkem a druhu vázaných kationtů.[1,4]

- Kaolinitické jíly

Do této skupiny řadíme kaolinit, dickit, nakrit, halloysit. Hlavní složkou kaolinu je kaolinit  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Surový kaolín pro výrobu forem není příliš vhodný pro vysokou teplotu spékání, která rozplavuje povrch formy. Lze jej však použít pro výrobu těžkých ocelových odlitků (směsný jíl pod označením Tumerit K), častější je však využití pro úpravu kuploven a licích pánví.[1,4]

- Illitické jíly

Jedná se o slídové jíly, obsažené ve většině přirozených písků. Hlavní složkou illitických minerálů je minerál glaukonit  $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_4 (\text{Si}, \text{Al})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_4 \cdot 1,0 \text{ až } 2,0 (\text{K}, \text{Mg}, \text{Ca})$ . Oxidy železa tvoří v glaukonitu 20 – 25 % složení. Tento jíl je velmi plastický a uděluje směsi vysokou vaznost. Díky vysoké teplotě spékavosti okolo 1300 °C vytváří na stěnách forem spečenou vrstvičku formovacího materiálu, která se snadno odlupuje z odlitků.[1,4]

- Montmorillonitické jíly

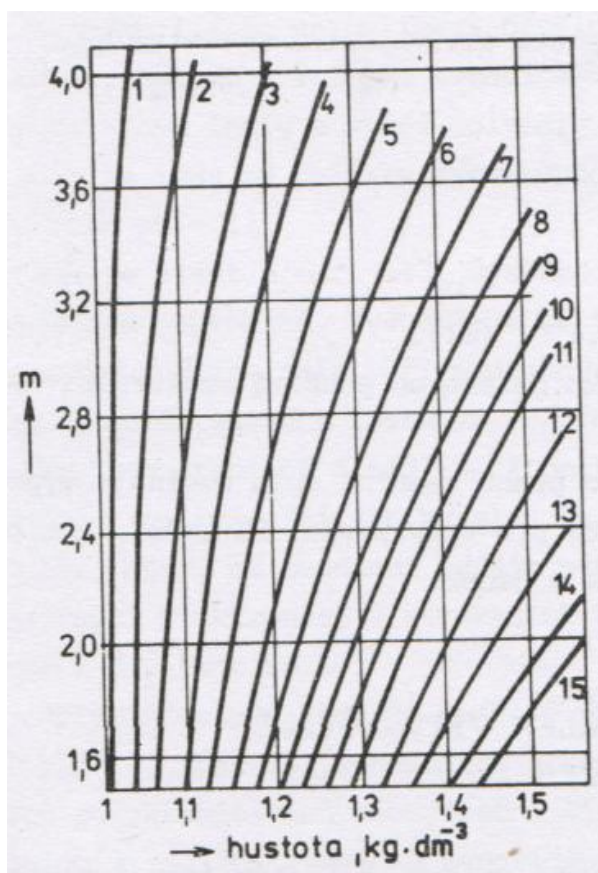
Tyto jíly disponují vysokou vazností, ale nízkou žáruvzdorností, teplota spékání se pohybuje od 900 °C až do 1200 °C. Nejdůležitější složkou je minerál montmorillonit,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$ . Okud je podíl montmorillonitu v pojivu vyšší než 75 %, nazýváme takové pojivo bentonitem. Bentonitová pojiva budou dále podrobně popsána v kapitole 3.[1,4]

- Vodní sklo

Je to koloidní roztok křemičitanu sodného  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Vlastnosti jsou ovšem podobné jako u roztoků polymerů a toto chování má dvojí charakter:

1. Roztok polymerů – reologické vlastnosti
2. Roztok elektrolytů – hustota, stlačitelnost a el. vodivost závisí na koncentraci

Přítomnost polymerních makromolekul přitom ve vodním skle není předpokládána. Vodní skla jsou vyráběna v rozsahu molárních poměrů  $\text{SiO}_2$  k  $\text{NaO}_2$  od 1:1 do 4:1, ve slévárenské praxi se užívají skla o poměrech 2:1 a 3:1. U vodních skel, která jsou užívána jako pojiva formovacích směsí určujeme tři charakteristiky: hustotu, modul a koagulační práh. Modulem je nazýván poměr molárních hmotností  $\text{SiO}_2$  :  $\text{NaO}_2$ . Při jeho určování můžeme užít Kromannova diagramu. Hustota vodního skla je zjišťována tzv. Bauméovými hustoměry, které jsou cejchovány v Bauméových stupních (nepatří mezi jednotky SI). Koagulační práh měříme pomocí přidávání roztoku  $\text{HCl}$  do kádinky s vodním sklem. Koagulační práh potom označuje množství  $\text{HCl}$ , při kterém při zkoušce vodní sklo začíná koagulovat (srážet se).[1,4]

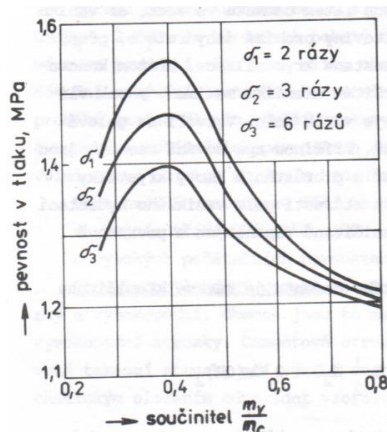


Obr. 4 – Kromannův diagram [4]

- Cementová pojiva

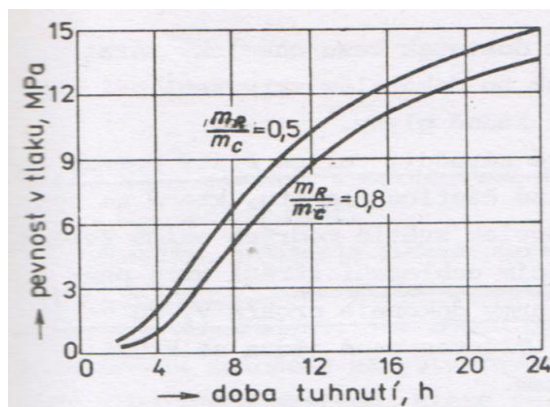
Hlavní surovinou pro výrobu cementů je zpravidla vápenec, který se vypaluje za přítomnosti tavidel (kazivec, železná ruda). Podmínkou výroba kvalitního cementu je, aby byly všechny suroviny co nejjemněji rozemlety a následně tak vznikla homogenní směs. Vypálenou směs je třeba ihned ochladit, aby se projevily hydraulické vlastnosti směsi. Poprvé je směs ochlazena vzduchem, podruhé studenou vodou až do poklesu teploty na 200 °C.

Aby cementová směs mohla ztuhnout, je třeba do ní přidat vodu. Hmotnost užité vody v poměru ke hmotnosti cementové směsi vyjadřujeme tzv. vodním součinitelem  $m_v/m_c$ . Tento se obvykle pohybuje v rozmezí od 0,6 – 0,8, největší pevnosti však směs dosahuje při hodnotě součinitele okolo 0,4.



Obr. 5 – Závislost pevnosti v tlaku na vodním součiniteli [4]

Hlavní výhodou cementových pojiv je především schopnost tuhnutí ve volné atmosféře bez potřeby sušení. Mezi zápory naopak patří dlouhá doba tuhnutí, která může v závislosti na typu cementu činit až 12 hodin. Při delší době tuhnutí se ale také zvyšuje pevnost v tlaku směsi [1,4].



Obr. 6 – Závislost pevnosti v tlaku na době tuhnutí [4]

- Pojiva keramických směsí

Volba pojiva pro keramické formovací směsi závisí na použité technologii.

Jako pojiva pro keramické směsi určené k lisování na trvalý model mohou být rozličné látky, které ale musí mít stálé fyzikálněchemické vlastnosti. Tuto podmínku splňují žáruvzdorné jíly, z nichž nejpoužívanější jsou surové plavené kaolíny. Pro dosažení požadovaných vlastností je třeba je smíchat s vodou.

Pro metodu oblévání keramického trvalého modelu je nejvíce používán alkosol polyethoxysiloxan, méně často hydrosol  $\text{SiO}_2$ . Tato pojiva jsou také vhodná k výrobě směsí metodou vytavitelných modelů.

Při výrobě keramických jader nejčastěji užíváme tzv. přechodná pojiva. Jsou to např. Naftalen, paradichlorbenzen, kafr, vosky a pryskyřice. Rozsáhle používány jsou rovněž syntetické termoplastické polymery, např. polyethylen, polypropylen, polystyren, polyethylenglykol.[4]

### 2.2.2 Struktura organických pojiv

- Pryskyřičná pojiva

Nejčastěji používanými pryskyřicemi jsou především fenolformaldehydové, močovinoformaldehydové, furanové, a kombinované pryskyřice. Tyto pryskyřice jsou vyráběny polykondenzací, další polykondenzací pak vznikají novolaky (pro výrobu skořepinových forem a jader a rezoly (při výrobě jader metodou horkých jaderníků). Všechny druhy používaných pryskyřic jsou toxické a při práci s nimi je proto nutno kontrolovat maximální přípustnou koncentraci škodlivin v ovzduší a dokonale odvětrávat pracoviště. [1,4].

- Olejová pojiva

Základní surovinou olejových pojiv jsou estery mastných nenasycených kyselin. Kvalita výsledné formovací směsi závisí na počtu dvojných vazeb v použité kyselině. Čím vyšší počet dvojných vazeb kyselina obsahuje, tím lépe tuhne a je vhodnější pro pískové směsi. Měřítkem počtu dvojných vazeb je tzv. jodové číslo. Pro slévárenské účely jsou nejvhodnější oleje s jodovým číslem vyšším než 130. [1,4]

- Sacharidová pojiva

Dle chemické struktury můžeme sacharidová pojiva rozdělit na:

1. Monosacharidy – vhodné pro výrobu jader metodou horkých jaderníků. Používají se pouze jejich odpadní produkty.
2. Oligosacharidy – tato skupina pojiv je již zastaralá, dříve rozšířené pojivo melasa se dnes používá pouze jako přísada do bentonitových směsí a jako přísada pro barviva forem pro odlévání šedé litiny
3. Polysacharidy – ve slévárenské praxi se uplatňuje škrob, celulóza a jejich deriváty [4]



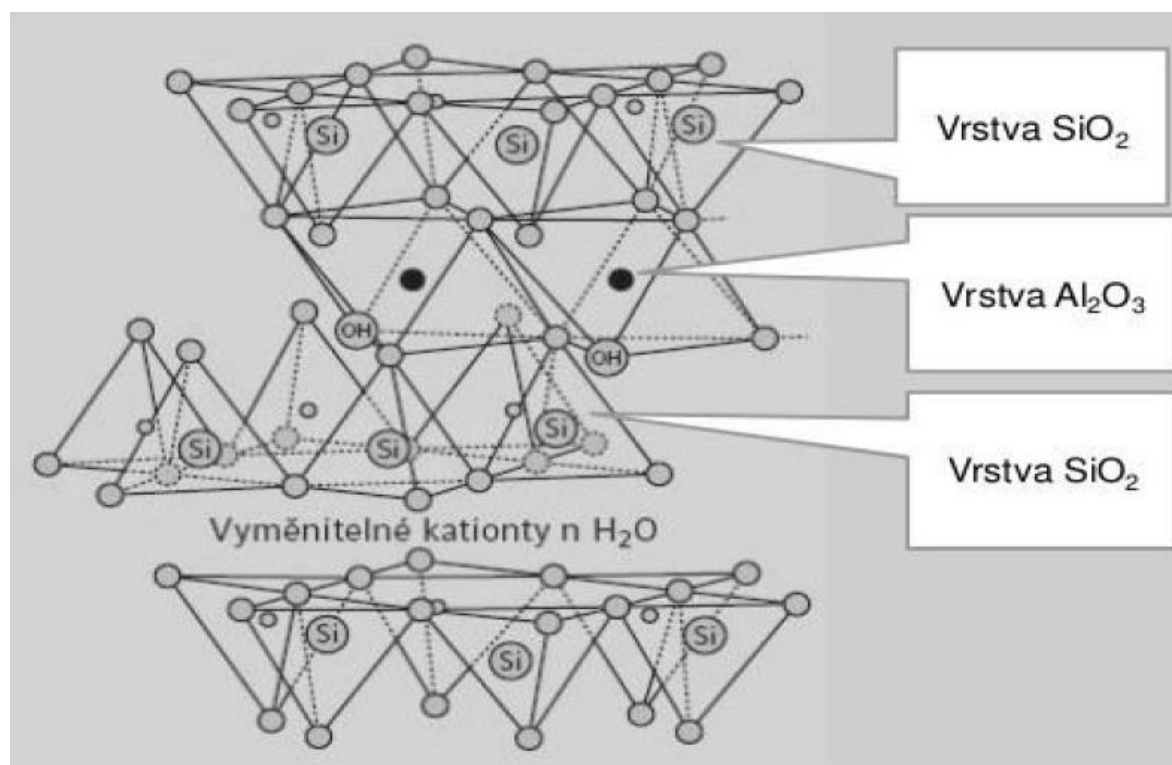
### 3 FORMOVACÍ SMĚSI S BENTONITOVÝM POJIVEM

Bentonitem nazýváme jíl s minimálním podílem 75 % montmorillonitu. Do bentonitových formovacích je odléváno asi 50 % celosvětové produkce odlitků. Jeho použití je výhodné zejména pro vysokou schopnost absorpce vody a velmi dobrou schopnost vaznosti. Bentonity si udržují svou schopnost absorpce až do 550 – 700°C a tím jsou tepelně stabilnější než ostatní jíly. Těmto směsím je dáována větší pozornost kvůli jejich použitím na automatických formovacích linkách.

Bentonitové jíly lze rozdělit na 2 typy:

1. Silně bobtnavé – sodné bentonity, ložiska pouze v USA
2. Méně bobtnavé – základními složkami jsou převážně hořčík, vápník a draslík. Pro zlepšení bobtnavosti se průmyslově obohacují sodíkem.

Minerál montmorillonit, který tvoří hlavní složku bentonitu, má vrstevnatou strukturu. Mezi dvěma vrstvami tetraedrů ( $\text{SiO}_4$ )<sup>4-</sup> (tzv. siliková vrstva) je vrstva oktaedrů ( $\text{AlO}_6$ )<sup>-</sup> (tzv. gibbsitová vrstva).



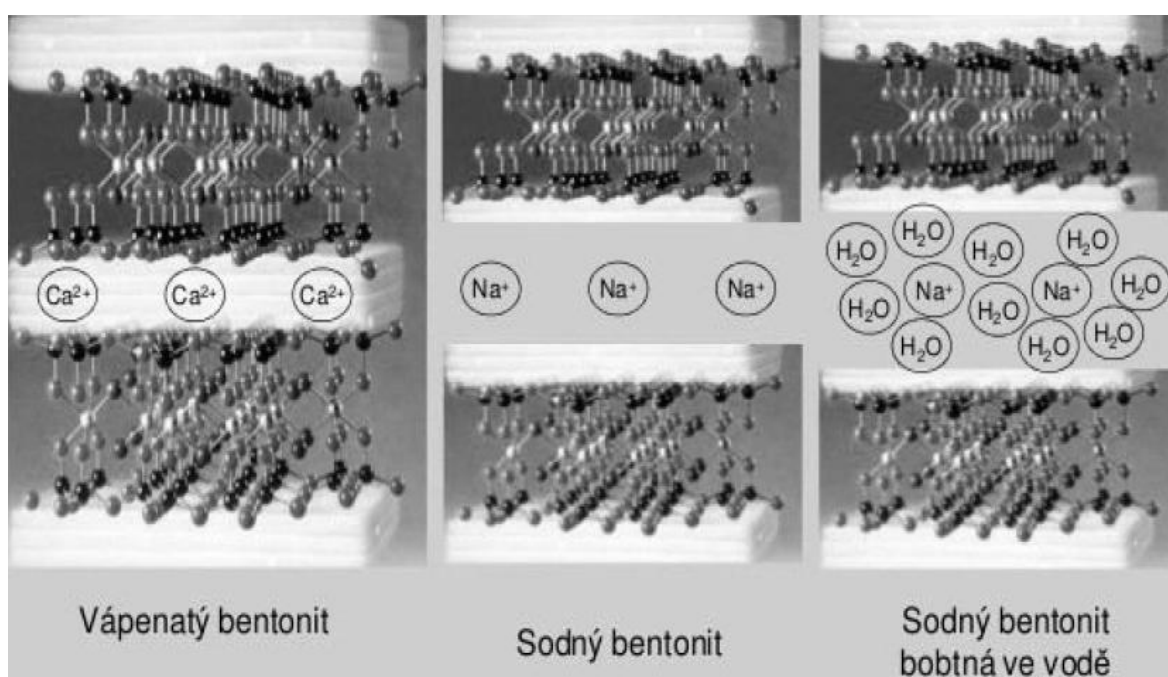
Obr. 7 – Struktura bentonitu

Tetraedry a oktaedry se spojují tak, že kyslíkové atomy silikové vrstvy jsou součástí koordinační sféry centrálního atomu gibbsitové vrstvy. Při poměru vrstev 2:1 jsou u montmorillonitu připojeny silikové vrstvy ke gibbsitové z obou stran. [4,5,6]

### 3.1 Natrifikace bentonitů

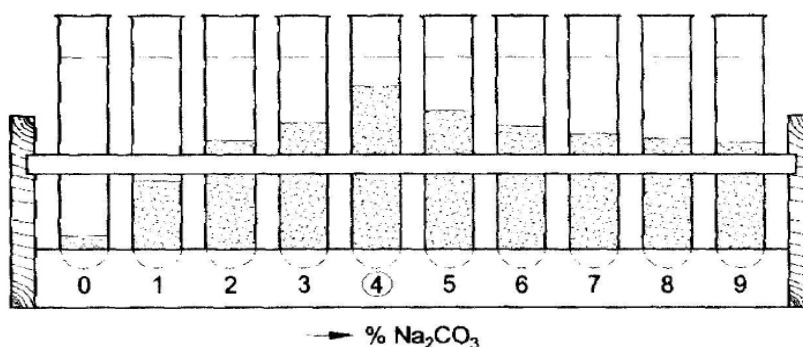
Natrifikací bentonitů se rozumí náhrada iontů  $\text{Ca}_{2+}$ ,  $\text{Mg}_{2+}$  nebo případně  $\text{Fe}_{3+}$  za ionty  $\text{Na}^+$ . Nejčastěji se provádí pomocí uhličitanu sodného  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  nebo u železitých bentonitů pomocí  $\text{NaOH}$ .

Cílem tohoto procesu je zvýšit bobtnavost jílu a zlepšit jeho technologické vlastnosti (vaznost, pevnost v kondenzační zóně, termostabilita). Mezi negativa nitrifikace patří zejména zvýšená osychavost formovací směsi (při rychlé výrobě forem na formovacích linkách nepříliš významné) a zvýšená oolitizace ostřiva.



Obr. 8 – Natrifikace bentonitu

V českém slévárenském průmyslu je v současnosti používán téměř výhradně natrifikovaný bentonit. Správné množství  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  při nitrifikaci lze určit zkouškou bobtnavosti dle E. Hofmana. Ideální množství je takové, kdy je objem bentonitu největší. [4,5]



Obr. 9 – Zkouška bobtnavosti

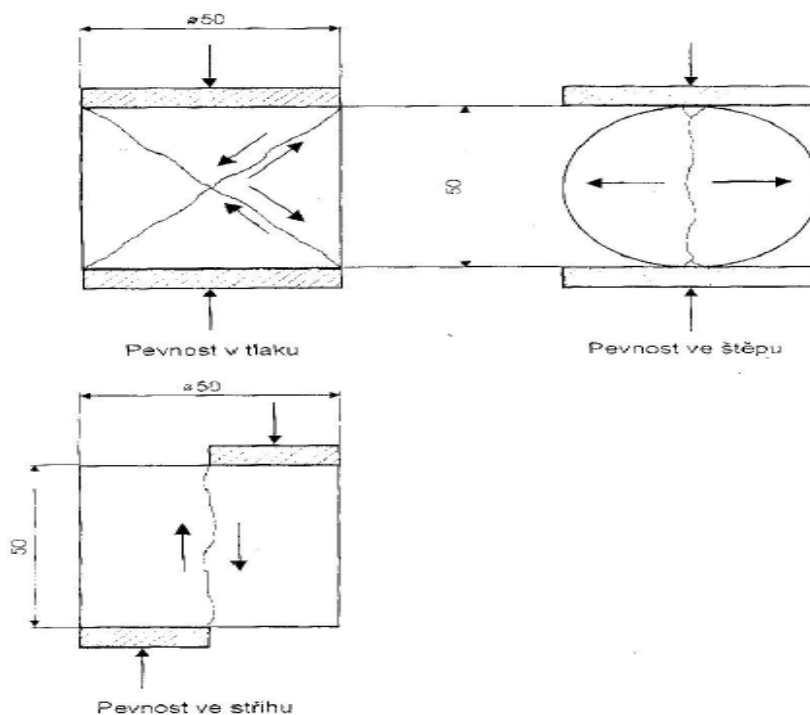
### 3.2 Jednotná bentonitová směs

Při každém výrobním cyklu se množství směsi zmenší a zbývající část směsi má v různých objemech velmi odlišné vlastnosti, závisující na vzdálenosti od stěny odlitku. Proto je nutné tuto směs následně zhomogenizovat, doplnit čerstvými surovinami a upravit technologické vlastnosti. Na rozdíl od jiných směsí není u jílových směsí nutná regenerace (destrukce obálek pojiva na zrnech ostřiva a odstranění pojiva ze směsi). [4,5]

### 3.3 Technologické vlastnosti bentonitových směsí

Technologické vlastnosti můžeme rozdělit na:

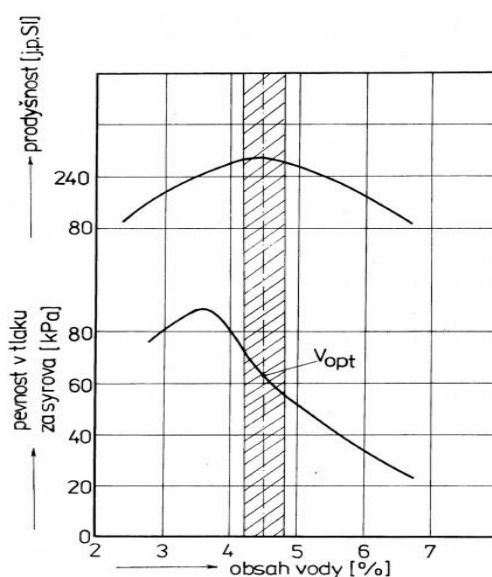
- Vaznost
- Pevnost v kondenzační zóně
- Pevnost ve štěpu
- Pevnost ve stříhu
- Prodyšnost
- Spěchovatelnost



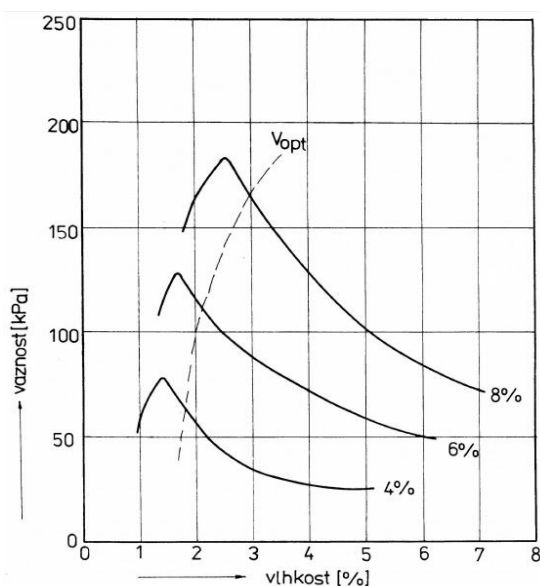
Obr. 10 – Některé technologické vlastnosti bentonitových směsí

Mezi další důležité charakteristiky, které je třeba u bentonitových směsí sledovat, patří vlhkost, prodyšnost, spěchovatelnost, množství vyplavitelných látek, obsah aktivního bentonitu, obsah spalitelných látek, obsah těkavých látek, stanovení obsahu lesklého uhlíku LC a pevnost v tahu v kondenzační zóně. Většina sléváren ovšem nedisponuje zařízeními, potřebnými k určení posledních dvou jmenovaných vlastností.

Prodyšnost směsi závisí na její vlhkosti. Za optimální hodnotu vlhkosti se považuje taková hodnota, kdy má směs maximální prodyšnost. Optimální hodnota vlhkosti je různá v závislosti na složení směsi. Na tom závisí také vaznost. [4,5]



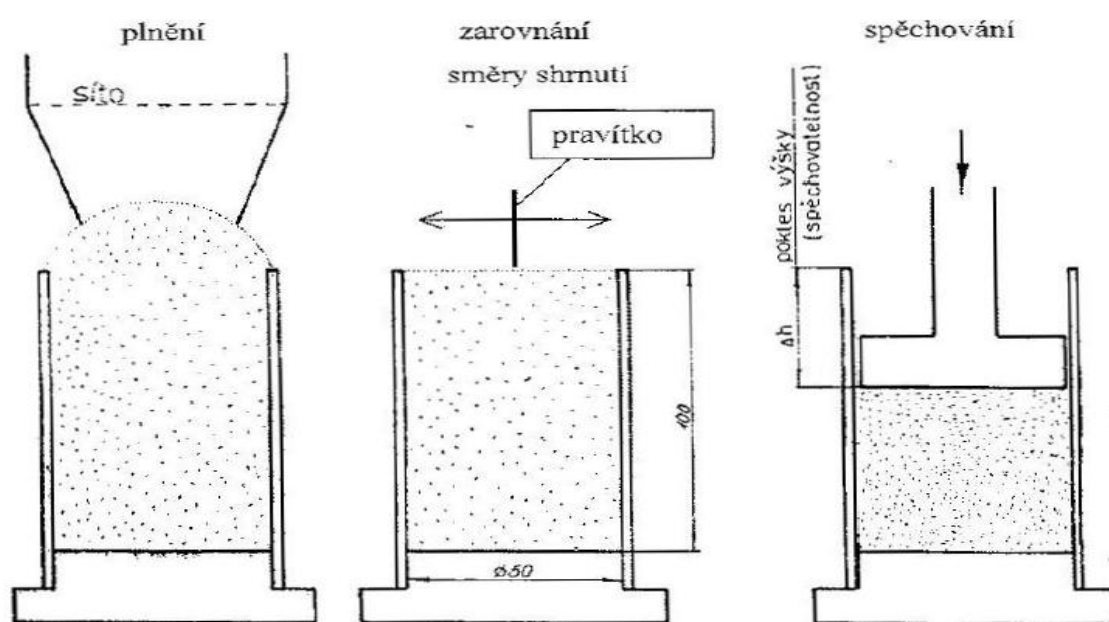
Obr. 11 – Závislost prodyšnosti na vlhkosti



Obr. 12 – Závislost vaznosti na vlhkosti

Se vzrůstajícím množstvím bentonitu vzrůstá i vaznost směsi a množství vody potřebné pro dosažení maximální prodyšnosti.

Jako spěchovatelnost se označuje schopnost objemového přetvoření a dosažení jisté objemové hmotnosti v uzavřeném objemu působením vnějšího zatěžování. Závisí na velikosti tohoto zatěžování a rovněž na vnitřním odporu formovací směsi. Zkoušku na spěchovatelnost lze provádět na hydraulickém přístroji nebo pomocí laboratorního pýchovadla. [4,5]



Obr. 13 – Zkouška spěchovatelnosti

Opakované pracovní cykly směs tepelně zatěžují, což způsobuje nenávratnou ztrátu pojivových schopností bentonitu. Tepelná stálost bentonitu je určena teplotou, při níž jíl ztrácí krystalovou vodu. Tato teplota se pohybuje od 200 – 400°C v závislosti na typu bentonitu. Podíl bentonitu, který ztrácí své pojivové schopnosti se tedy zvyšuje a tuto ztrátu je nutné kompenzovat.

.Tab. 1 – Doporučené technologické hodnoty bentonitové směsi

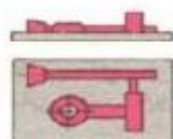
vlhkost	dle požadované spěchovatelnosti			
spěchovatelnost	impulzní pýchování 30 – 40 %	vstřelování + dolisování 30 – 40 %	střásání + dolisování 40 – 55 %	ruční formování  50 – 60 %
prodyšnost	ocelové odlitky 150 – 350 n.j.p.		litinové odlitky 100 – 200 n.j.p.	
vaznost	dle způsobu formování 90 – 230 kPa			
pevnost v tahu v kondenzační zóně	minimální hodnota 1,5 kPa, optimální hodnota 2,0 – 3,5 kPa			
vyplavitelné látky	ocelové odlitky 8 – 11 %		litinové odlitky 11 – 14 %	
ztráta žíháním	ocelové odlitky max. 2 %		litinové odlitky 4 – 6 %	
aktivní bentonit	dle způsobu formování 6 – 10 %			

## 4 VÝROBA BEZRÁMOVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FOREM

### 4.1 Metoda Croning

Jedná se metodu výroby a odlévání do skořepinových forem. Výrobu formy dle této metody můžeme popsat následujícími operacemi:

1. Kovová modelová deska spolu s kovovým modelem je zahřáta na 200 – 250°C a pokryta dělicím prostředkem. Na takto připravenou desku je nasypána (nebo nastřelena) obalovaná pryskyřičná směs. Jejím natavením a vytvrzením se během 15 – 20 sek. vytvoří skořepina tlustá 5 – 8 mm.
2. Modelová deska se otočí o 180° a přebytečná směs se odsype.
3. Modelová deska i s modelem se umístí do pece o teplotě 280 – 320°C kde dojde ke konečnému vytvrzení
4. Po vytažení modelu se skořepinou se pomocí zvedacích kolíků skořepina zvedne a následně sejme. Stejným způsobem se vyrobí i druhá polovina formy a poté se obě poloviny slepí. Uvnitř formy mohou být případně uložena jádra. [2,7]



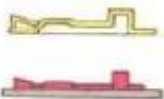
1) Modelová deska



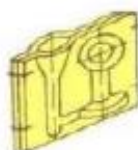
2) Zlacení plátna z modelovou deskou před překlopením



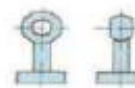
3) Vytváření skořepiny



4) Vytvrzená skořepina



5) Skořepinová forma připravená k lití



6) Odlitek

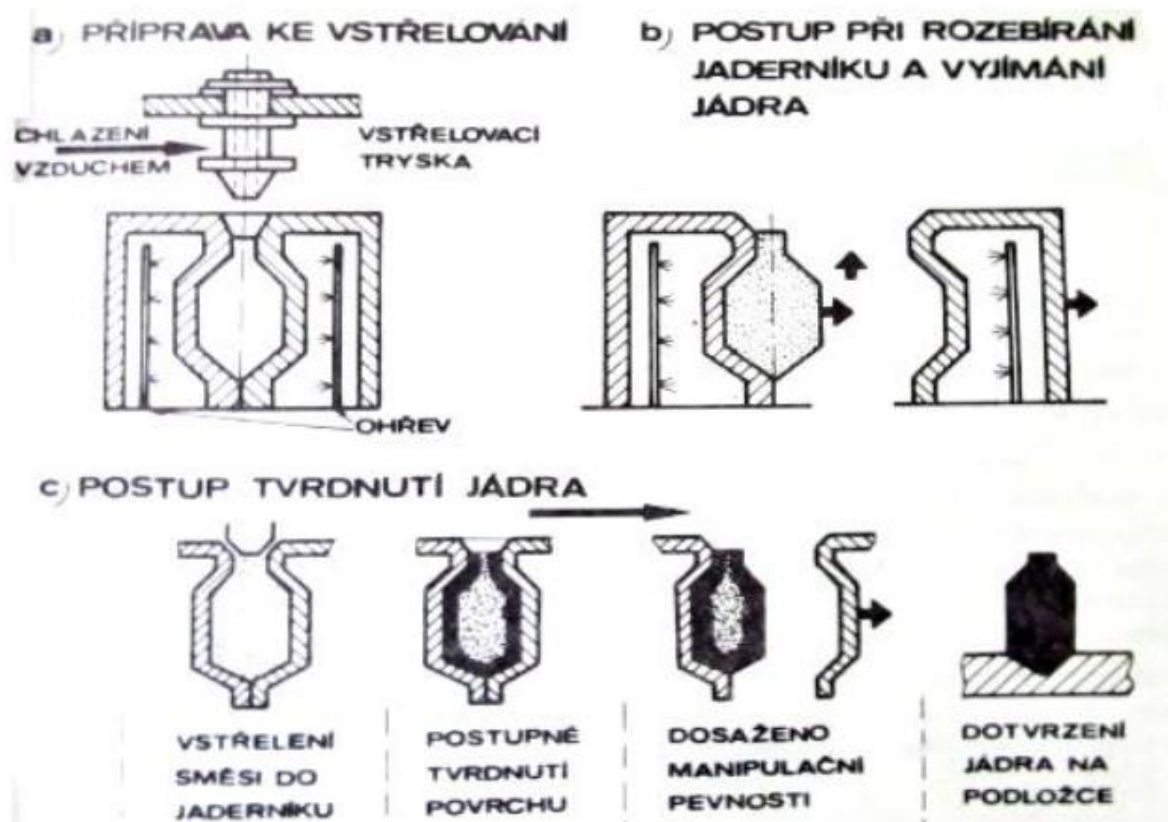
Obr. 14 – Formování metodou Croning [8]

## 4.2 Metoda horkých jaderníků (hot-box)

Při použití této metody dochází působením tepla k vytvrzení jádrové směsi v jadernících, zahřátých na teplotu 180 – 300°C.

Kromě výroby jader je takto možné vyrábět rovněž skořepinové formy nebo formy pro stomečkové lití rozměrově malých odlitků.

Tato metoda je dnes postupně nahrazována jinými metodami kvůli nutnosti použití složitých systémů vyhřívání jaderníků a rozměrovým nepřesnostem. Rozdíl mezi Croningovou metodou a metodou hot-box spočívá v tom, že u metody horkých jaderníků je třeba vyrábět plná jádra. [8,9]



Obr. 15 – Metoda horkých jaderníků [9]

## 5 AUTOMATICKÉ BEZRÁMOVÉ FORMOVACÍ LINKY

Jedná se o nejrozšířenější způsob výroby bezrámových forem na větě.

Při rámovém formování je třeba přemístit uvolněný rám zpět k formovacímu stroji. Ve snaze o zjednodušení formovacího procesu byly sestaveny stroje, které vyráběly obě poloviny forem v rámech a po dokončení formování se z formy stáhly. Tyto stroje se ale příliš neprosadily. Po zavedení lisování s vyšším měrným tlakem se začaly uplatňovat automatické bezrámové formovací linky (BFL). Tyto stroje jsou spojeny s firmou DISA Industries A/S, která je od 60. let minulého století produkuje pod názvem Disamatic. Automatická bezrámová formovací linka je kromě vlastního formovacího stroje vybavena periferiemi pro výměnu modelů nebo zakládání jader a manipulačními zařízeními, tj. dopravníky, chladiči, uvolňovacím uzlem. Koncovým produktem linky je složená forma se založenými jádry. Linky můžeme rozdělit na BFL se svislou a BFL s vodorovnou dělicí rovinou. [2,7]

### 5.1 Bezrámové formovací linky s vertikální dělicí rovinou

Linky se svislou dělicí rovinnou jsou velmi výkonné, a jako takové mají vysoko spotřebu formovací směsi.

Postup produkce je následující:

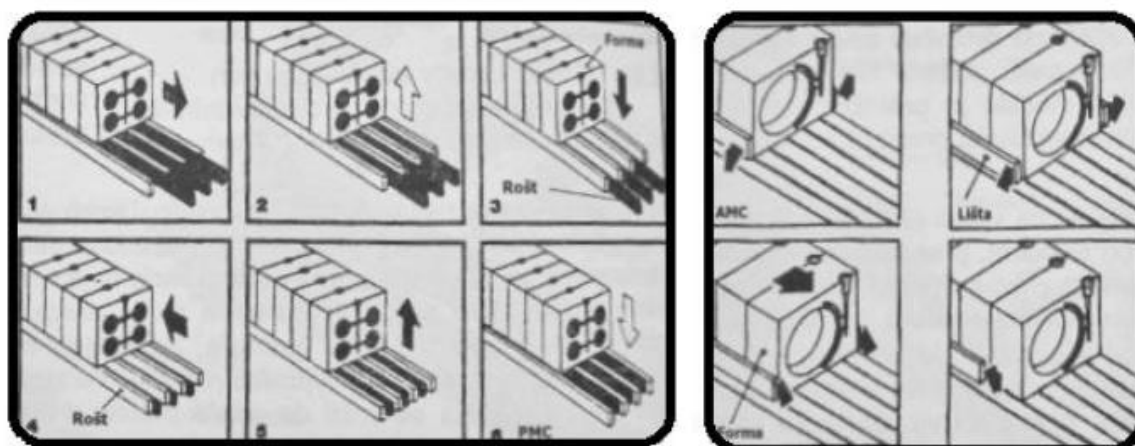
1. Do vstřelovací komory je nadávkována směs a komora je uzavřena plochým šoupátkem.
2. Vstřelovací ventil se otevře a směs je prostřednictvím stlačeného vzduchu vstřelena do formovací komory. Při vstřelování je nutné užít nižší tlak, aby se směs předčasně neupěchovala.
3. Po odvzdušnění vstřelovací komory je směs lisována z obou stran modelovými deskami za požadovaného tlaku (max. 2 Mpa). Současně pracují vibrátory. Odklopná lisovací deska je sklopena do horizontální polohy, čímž dojde k otevření formovací komory. Vibrátory pracují i během vyjímání a povrch formy je možné očistit od uvolněné směsi stlačeným vzduchem
4. Lisovací deska vysune novou formu z komory. Krátce před dotlačením na předchozí formu je rychlost zmenšena. Po dosažení požadovaného tlaku při skládání přesouvá lisovací deska v součinnosti s krokovým dopravníkem řadu forem dopředu. Lisovací deska se poté vrátí do výchozí polohy a současně se na obě modelové desky nastříkne dělicí prostředek. Poté se do původní polohy vrátí i odklopná deska a obě desky se vycentrují vůči vstřelovacímu otvoru. [2,7]





Obr. 16 – Princip bezrámového formování s vertikální dělicí rovinou [10]

Na této postup navazují krokový a pásový dopravník, které slouží k posuvu forem v oblasti odlévání. Typ krokového dopravníku je nutno zvolit v závislosti na velikosti formy. Pro menší a lehčí formy je používán typ AMC, pro rozměrnější a těžší formy typ PMC.



Obr. 16 – Krokové dopravníky AMC, PMC [2]

Zakládání jader může probíhat buď ručně nebo automaticky. Ruční zakládání probíhá v jedné poloze před kompletací forem. Obsluha při tomto procesu zakládá jádra do dutin v desce automatického zakladače (CSE). Dutiny jsou připojeny na zdroj podtlaku, jehož prostřednictvím jsou jádra založena do formy.

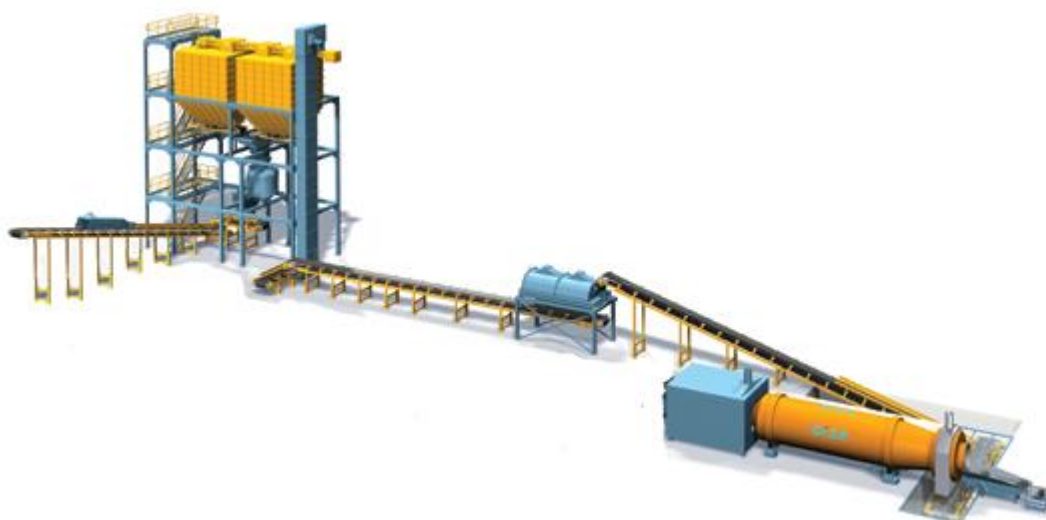
Automatické zakládání forem a výměna modelových desek probíhá pomocí kombinovaného zakladače. Nejprve jsou jádra ručně založena do montážních přípravků na jejich oběhu. Z těchto přípravků jsou jádra automaticky odebírána zakládací deskou, která se vyklopí do vodorovné polohy. Po snížení desky nad montážní přípravek jsou pod tlakem přisáta jádra a zpětným pohybem desky jsou následně založena. [2]

Pro uvolňování forem v linkách Disamatic se používají uvolňovací bubny, které oddělují a vodou ochlazují vratnou směs a odlitky. Směs je přesévána v konečné části bubnu přes otvory o průměru 30 mm. Maximální teplota vstupujícího odlitku je obvykle 700 °C, výstupní teplota se pohybuje okolo 70 – 90 °C. Teplota vystupující vratné směsi je 45 – 55 °C s obsahem vody maximálně 1,8 %. [2]

U novějších linek je garantována přesnost i méně než 0,1 mm. Rychlost produkce forem závisí na jejich tloušťce. Linka DISA 230 je při standardní tloušťce formy 200 mm schopna vyrobit až 500 bezjádrových nebo 440 forem s jádrem za hodinu. U takto pokročilých strojů je také zajištěn vysoký stupeň automatizace, který snižuje požadavek obsluhy na minimum. Součástí základního programu je:

- Kontrola veškerých částí formovací linky
- Nepřetržité monitorování stlačitelnosti
- Monitorování pozic a rychlostí pohyblivých částí
- Autodiagnóza elektrického hardwaru pro rychlou opravu chyb
- Automatická úprava nastavení stroje na základě nastavených údajů o modelu

U sléváren s omezenými prostorovými možnostmi mohou představovat problém rozměry linky, zejména pak délka krokového a synchronního pásového dopravníku. V takovém případě může být dodán kyvadlový chladič dopravník (shuttling conveyor). [10,11]

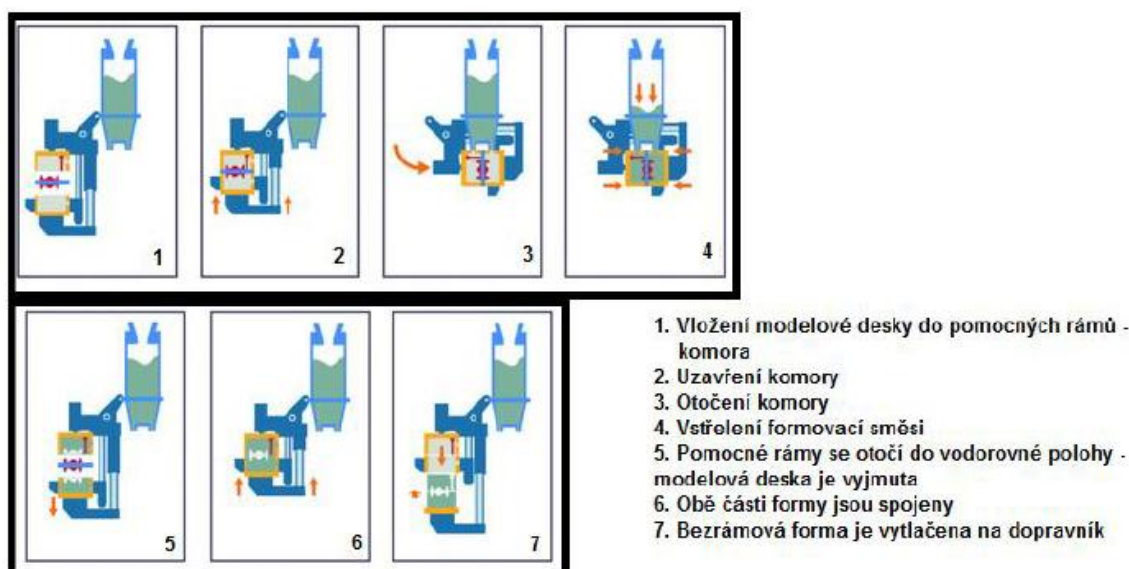


Obr. 17 – BFL s vertikální dělicí rovinou Disamatic [12]

## 5.1 Bezrámové formovací linky s horizontální dělicí rovinou

Bezrámové formování s horizontální dělicí rovinou je výhodné pro odlitky s malým množstvím jader kvůli jejich snadnému usazení, jakož i z hlediska technologického (odlitky lze umístit symetricky vzhledem ke vtokovému kůlu. [7]

Výroba forem na těchto linkách je rychlá. Vlastní formování probíhá ve formovací komoře, která nahrazuje rámy. Používají se oboustranné modelové desky. Obě poloviny forem se sejmou z modelu, v jedné poloze jsou založena jádra a poté se forma složí a vytlačí ven z formovací komory. Pro zabránění přesazení se na složené formy navlékají pomocné rámy, tzv. žakety. Proti vztlaku jsou zajištěny pokládáním tzv. úkladků. [2,7]



Obr. 18 – Princip bezrámového formování s horizontální dělicí rovinou [13]

Bezrámové stroje s horizontální dělicí rovinou můžeme rozdělit do dvou skupin:

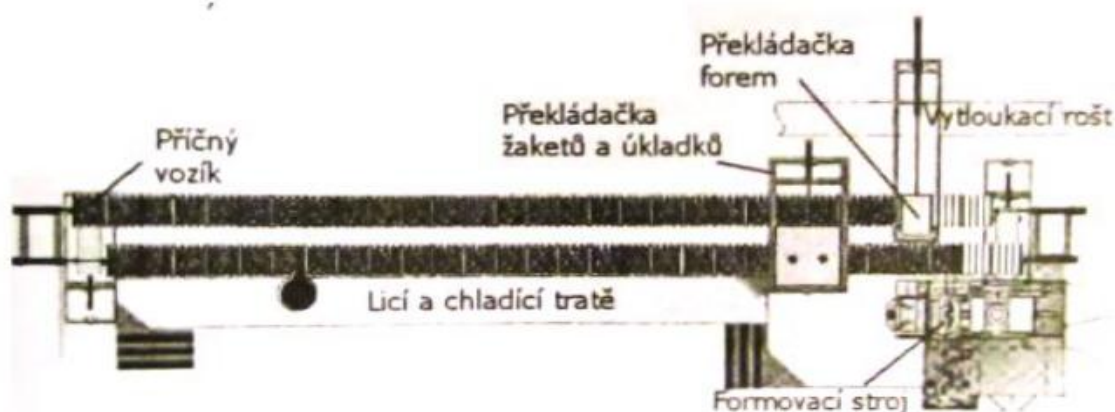
- Bezrámové formovací stroje vstřelovací a lisovací
- Bezrámové formovací stroje podtlakové a lisovací
- Bezrámové formovací stroje lisovací [2]

### 5.1.1 Bezrámové formovací stroje vstřelovací a lisovací

Postup výroby na těchto strojích probíhá tak, že na horní straně modelové desky (oboustranné) je upevněn model pro horní polovinu a analogicky je upevněn i model spodní. Na modelovou desku jsou následně přitlačeny pomocné rámy a současně se z obou stran vstřelí formovací směs tlakem vzduchu 0,2-0,25 MPa. Formy se oddělí od modelu a ten se vysune ze stroje. Spodní forma se umístí na

karusel, jehož otočením se dostane před formovací stroj a na její místo se dopraví dříve vyrobená poloforma, do níž byla založena jádra.

Poloformy jsou potom složeny, pomocné formovací rámy stáhnuty a hotová bezrámová forma je odsunuta na lici a chladicí trať. Vstřelovacím procesem je zajištěno rovnoměrné zhutnění směsi, lze takto vyrobit formy pro odlévání odlitků komplikovaných tvarů se slabou stěnou. Hospodárnost využití směsi je garantována možností nezávislého nastavení výšky horní a podní poloformy. Formy mohou mít rozměr až 900 x 700 mm, rychlost produkce se pohybuje od 80 – 170 forem/hod. Výhodou těchto strojů je také jejich nízká hlučnost. [2,7]



Obr. 19 – Bezrámová formovací linka se vstřelovacím strojem [2]

### 5.1.1 Bezrámové formovací stroje podtlakové a lisovací

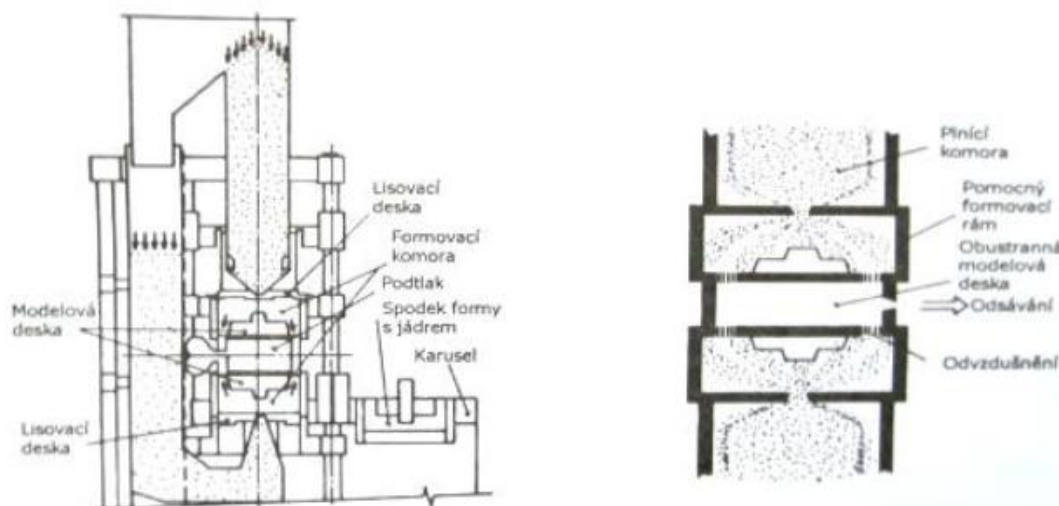
Tyto stroje jsou konstrukčně analogické jako stroje vstřelovací, princip plnění je ale odlišný. Komory se plní svisle pomocí podtlaku a poloformy jsou následně lisovány. K vyjímání modelu se využívá přetlak vzduchu.

Na začátku je naplněn horní zásobník a následně je směs vsypána do zásobníku spodního. Tlakový zásobník vakua je prostřednictvím ventilů spojen s nosičem modelových desek ve spodní nebo současně v obou komorách. Směs je nasáta nejdříve do spodní komory a poté i do horní. Proces nasávání je zcela bez hluku a vibrací. Následuje lisování, při němž se do forem vtlačuje model. Bezprostředně před rozebíráním se za modelovou desku přivede stlačený vzduch, který pomáhá při vyjímání modelu. Zakládání jader a složení formy je shodné s postupem u vstřelovacího stroje. Formy jsou dopravovány na paletách, jejichž rozměry jsou menší než rozměry forem, v důsledku čehož se přední strana modelové formy dotýká zadní stěny formy předchozí. Dotlačování forem k sobě je řešeno nastavitelnou silou, systémem pohonu a brzdění. Na konci úseku forma přechází na chladicí dopravník a poté do překládací stanice a na článkový chladicí dopravník. Zatěžovací závaží a paleta se zvednou a přemístí se zpět na první polohu odlévacího úseku.

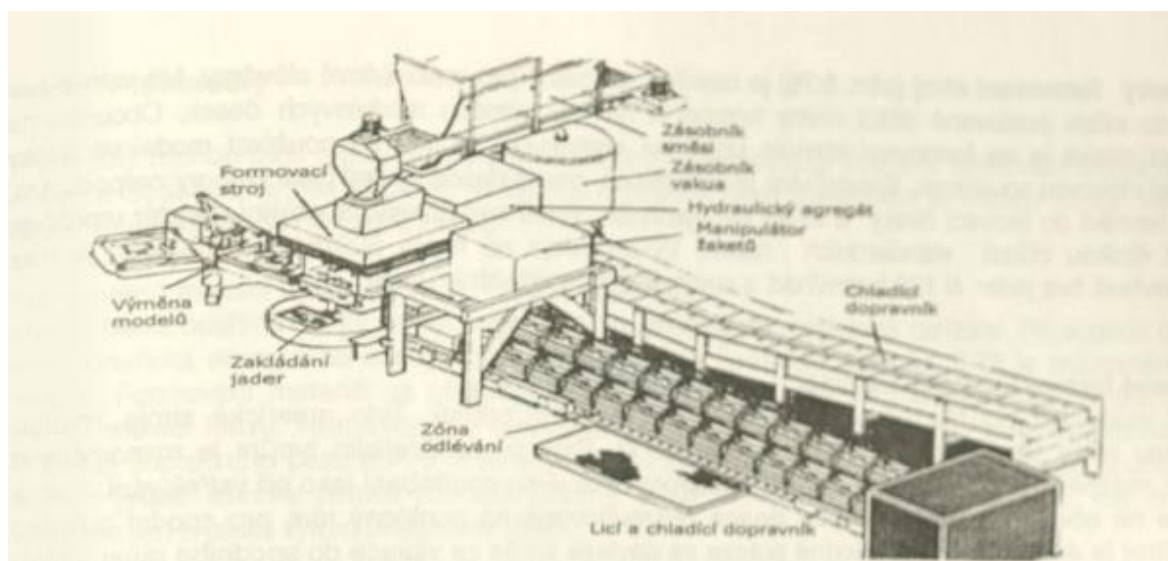
Výška spodní a horní části je nastavitelná dle konkrétního modelu. Modely jsou rychle vyměnitelné (30s). Díky horizontálnímu dělení lze použít konvenční



modelová zařízení včetně vtokových soustav, a dokonce i dřevěné modely. Výkon takovýchto strojů je až 150 forem/hod. [2]



Obr. 20 – Bezrámový stroj podtlakový a lisovací [2]

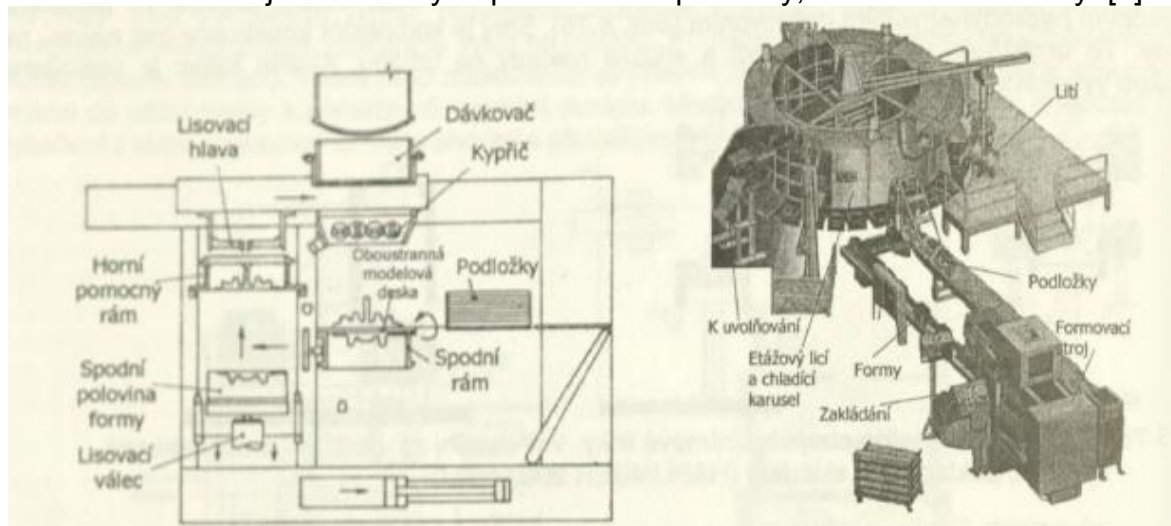


Obr. 21 – BFL se strojem podtlakovým a lisovacím [2]

### 5.1.1 Bezrámové formovací stroje lisovací

Tyto stroje se používají při sériové výrobě jednoduchých odlitků. Zhutňování směsi probíhá lisováním za vibrace, oproti předchozím typům je ale rovnoměrnost zhutnění znatelně horší. Modely zato nejsou opotřebovávány tak jako při vstřelování. Lisování formy probíhá na oboustranné modelové desce přišroubované na pomocný rám pro spodní poloformu. Stroj je dvupolohový: v jedné poloze je dávkována směs do spodního rámu, následně se přiloží

podložka a otočí se modelová deska s rámem. V poloze druhé je směs dávkována prostřednictvím pojízdného dávkovače do hroního rámu a poté se obě poloformy lisují proti pojízdné desce. Výkonnost těchto strojů je 70-160 forem/hod. Do formovacích linek jsou vřazeny doplněním o dopravníky, chladicí a licí úseky. [2]



Obr. 22 – Lisovací stroj a BFL s lisovacím strojem [2]

## 6 SROVNÁNÍ BEZRÁMOVÝCH LINEK A LINEK S RÁMY

Bezrámové formovací linky jsou nejrozšířenější ve slévárnách v USA, zatímco v Evropě převažují linky rámové.

Současné slévárenské provozy požadují možnost výměny modelů v taktu stroje pro simultánní produkci více druhů sortimentu. Dle počtu pracovních poloh a řešení výměny modelů můžeme formovací stroje dělit na:

- Jednopolohové, svoupolohové, třípolohové, vícepolohové
- Se stabilním modelovým zařízením
- Shuttle systémem (s přímočarou výměnou modelů)
- S karuselovou výměnou modelů
- S oběhem modelů po pravoúhlé dráze

V linkách je vždy umístěn výkonný formovací stroj, který tvoří formovací uzel s doplňky, jako např. obracečky formovacích rámců, frézování vtokových kúlů, válečkové dopravníky, skládací stanice horních a spodních rámců, manipulační zařízení, odlévací zařízení. Důležitou součástí těchto linek tvoří i prostory pro ukládání jader, která se do forem zakládají ručně nebo automaticky.

Stejně jako BFL jsou i rámové linky vybaveny počítačovým řízením a diagnostickým systémem. Informace jsou poskytovány v grafické podobě a obsahují informace o nastavených parametrech stroje, jeho funkci, poruchách, stejně jako o formování a odlévání, jádrech, objemu směsi, modelech. Důležitá procesní data jsou uchovávána v databázi, standardem je rovněž přímé telefonní spojení s výrobcem.

AFL s rámy disponují téměř neomezenou možností variant v závislosti na poloze a míře automatizace. Jejich nevýhodou, která u BFL odpadá, je nutnost manipulace s rámy (od uvolňování zpět k formovacímu stroji) a tím zvýšení doby produkce. Rámy je také třeba pojistit proti vztlaku umístěním závaží nebo sevřením háky. Výkon těchto linek se pohybuje od 50 – 200 forem/hod, zatímco u BFL lze dosáhnout rychlosti více než 500 forem/hod. [2,7,10]

## 7 ZÁVĚR

V této práci byly popsány metody výroby slévárenských forem s bentonitovým pojivem, zejména pak na automatických bezrámových formovacích linkách.

Tato metoda produkce je spojena s vysokou efektivitou, malou zmetkovitostí, vysokým výkonem produkce a možností výroby tvarově složitých odlitků. Velkou výhodou je zde absence rámců, což znamená ušetření času potřebného k manipulaci s nimi. Největší průlom bylo v tomto ohledu zavedení strojů s vertikální dělicí rovinou, které poskytují vyšší výkon při nižší spotřebě energie a menším prostoru než linky horizontální.

Bentonitové pojivo zůstává nadále nejdůležitějším pojivem, užívaným pro výrobu formovacích směsí. Pomocí bentonitových forem se odlévá více než 50 % celkové tonáže odlitků na světě. V současnosti stále probíhá vývoj a zdokonalování nových generací bentonitových pojiv, stejně jako rozvoj formovacích strojů a zlepšování jejich vlastností a rychlosti produkce.



**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie slévání*. 3. upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006. ISBN 80-7043-491-0.
- [2] CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-455-9.
- [3] DVOŘÁK, Milan a kol. *Technologie II*. 3. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
- [4] RUSÍN, Karel. *Slévárenské formovací materiály: celost. vysokošk. učebnice pro skupinu stud. oborů strojírenství a ostatní kovodělná výroba*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1991. ISBN 80-030-0278-8.
- [5] KŘELINA, Bohumil a kol. *Bentonity pro slévárenství*. Ústí nad Labem: Dům techniky ČSTVS, 1988.
- [6] BEELEY, Peter R. *Foundry technology*. 2nd ed. Boston: Butterworth Heinemann, 2001. ISBN 07-506-4567-9.
- [7] MORES, Antonín a Milan NĚMEC. *Technologická zařízení sléváren*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04490-2.
- [8] KŘÍŽOVÁ, Irena. *Výroba bezrámových slévárenských forem*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 36, s. Vedoucí práce: Ing. Petr Cupák, Ph.D.
- [9] HORÁČEK, Milan a Jan HOREJŠ. *Slévárenská technologie I*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1990, 166 s. ISBN 80-214-0217-2.
- [10] KOFFLER, Christopher a Juraj TROJAN. DISA 230 - revoluce v evoluci. *Slévárenství*. Brno, 2002, L(8 - 9), 338 - 340.
- [11] MITCHELL, Jonathan. Advantages of vertical moulding. *Foundry Trade Journal*. 2002, 176(3595), 14. ISSN 0015-9042.
- [12] DISA shaping industry[online]. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: [http://www.disagroup.com/en/sites/disa/content/equipment/sand\\_preparation/sand\\_plant\\_tower.aspx](http://www.disagroup.com/en/sites/disa/content/equipment/sand_preparation/sand_plant_tower.aspx)
- [13] IDCastings [online]. 2014 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://idcastings.com/capabilities.html>

